



Identificación modal de un puente viga cajón usando mediciones óptimamente seleccionadas de ensayos de excitación ambiental

Modal identification of a box girder bridge using optimally selected measured data from ambient vibration testing

Álvaro Viviescas Jaimes¹, Laura Andrea Vargas Carvajal², Carlos Alberto Riveros Jerez³

¹Grupo de investigación INME, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Correo electrónico: alvivija@uis.edu.co

²Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile. Correo electrónico: lavargas3@uc.cl

³Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Colombia. Correo electrónico: carlos.riveros@udea.edu.co

Recibido: 6 mayo, 2018. Aceptado: 2 noviembre, 2018. Versión final: 22 diciembre, 2018.

Resumen

En Colombia actualmente se desarrollan a gran escala proyectos de construcción de vías de cuarta generación (4G). Por razones topográficas y económicas, los puentes en esta clase de proyectos tienden a ser cada vez más largos, con apoyos intermedios altos y ubicados principalmente en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta. Este artículo presenta los resultados de identificación modal con base en mediciones en condiciones de excitación ambiental del puente Gómez Ortiz. Este puente corresponde a una tipología de viga cajón y se encuentra localizado en la vía Girón – Zapatoca, en el departamento de Santander, Colombia. En el presente estudio se implementan un algoritmo de óptima localización de sensores y un método de identificación modal previamente desarrollados y aplicados en varios estudios de identificación modal de puentes de diferentes configuraciones. Los resultados presentados en este artículo, con un número limitado de sensores, muestran buena correlación con los resultados utilizados en la calibración del modelo numérico del puente previamente desarrollado y que corresponde a la línea base del puente.

Palabras clave: ensayo de excitación ambiental; identificación modal; método ERA-OKID-OO; óptima localización de sensores; puente viga cajón.

Abstract

In Colombia, construction projects for fourth generation (4G) roads are currently being developed on a large scale. For topographical and economic reasons, bridges in this kind of projects tend to be increasingly long, with high intermediate supports, and located mainly in intermediate and high seismic hazard zones. This article presents the modal identification results obtained in the Gómez Ortiz bridge using data measurements collected from ambient excitation sources. This bridge corresponds to a box girder bridge type and is located on Girón-Zapatoca road, in the department of Santander, Colombia. In the present study, an optimal sensor localization algorithm and a modal identification method previously developed and applied in several modal identification studies of bridges of different configurations are implemented. The results displayed in this article using a limited number of sensors show good correlation with the results used in the calibration of the numerical model of the previously developed bridge and that corresponds to the baseline of the bridge.

Keywords: box girder bridge; ambient excitation testing; modal identification; optimum sensor location; ERA-OKID-OO method.

1. Introducción

El aumento de proyectos de infraestructura en Colombia ha generado de forma paralela la necesidad de desarrollar metodologías que permitan determinar, con la mayor exactitud posible, la condición estructural en casos donde se presenten afectaciones por uso o condiciones ambientales que pueden comprometer el correcto funcionamiento de puentes durante su vida útil. Si bien el Código colombiano de diseño sísmico de puentes, CCP-14 [1], presenta los procedimientos de diseño de puentes nuevos y de reforzamiento de puentes existentes, esta norma no establece procedimientos para medición de la respuesta dinámica real de un puente como un parámetro por considerar para verificación de diseños o estudios de reforzamiento estructural. Es importante notar que la medición de respuesta dinámica de un puente requiere la instalación de diferentes instrumentos de medición, con el fin de obtener su respuesta dinámica bajo diferentes condiciones de excitación. Si bien el costo de estos instrumentos de medición se ha reducido gracias a los avances tecnológicos, aún sigue siendo costoso y, en algunos casos, no práctico ubicar en un puente un alto número de sensores de forma permanente. Paralelo al avance tecnológico de estos instrumentos de medición, se han desarrollado diferentes técnicas que permiten evaluar y hacer seguimiento del comportamiento estructural durante la vida útil de un puente haciendo uso de ciertas propiedades dinámicas, que previamente se miden, y con esta información se procede a hacer un análisis de variación entre mediciones iniciales y actuales. Esto se realiza con el fin de identificar posibles variaciones respecto al registro inicial o línea base.

Según [2], en algunas zonas de Colombia, los gradientes de temperatura pueden ser del orden de 20 °C, por lo que mediciones de respuesta dinámica pueden ser afectadas, y esto causa variaciones con respecto a la línea base no inducidas por deterioro de un puente. Este aspecto requiere el desarrollo de metodologías de identificación modal que permitan clasificar las zonas más favorables para localización de sensores, con el fin de optimizar la calidad de los datos de excitación ambiental. Si bien es posible utilizar enfoques de excitación forzada en puentes, el solo hecho de interrumpir el tráfico puede causar inconvenientes en su implementación práctica, por lo que los métodos basados en excitaciones ambientales pueden resultar más favorables, con el fin de realizar mediciones continuas.

El área de óptima localización de sensores se fundamenta en estudios realizados en las décadas de los años 80 y 90, en la industria aeroespacial. Los métodos desarrollados en estudios de vehículos aeroespaciales determinan la localización de sensores buscando maximizar la

independencia lineal de los modos numéricos de vibración. El método más representativo corresponde a la propuesta de [3]. Métodos enfocados a estructuras civiles han sido desarrollados con base en modificaciones de este enfoque, incluyendo, por ejemplo, la energía modal de deformación y el efecto de ruido en las mediciones [4]. Estudios más recientes de óptima localización de sensores en puentes no solo han presentado mejoras de diferente tipo en los métodos, sino que han validado sus hallazgos con mediciones dinámicas. Un estudio reciente realizado por [5] en el puente Eduardo Torroja, localizado en la provincia de Córdoba, España, utilizó un modelo en elementos finitos del puente, previamente ajustado con base en mediciones dinámicas, para determinar las 4 mejores posiciones para localizar sensores dentro de un grupo de 105 posiciones. Los autores demostraron que los resultados de identificación modal para las 4 posiciones seleccionadas dan resultados muy similares a los obtenidos para toda la campaña experimental de medición. Según [5], solo 4 posiciones de medición son suficientes para identificar las principales frecuencias modales, y, por tanto, un sistema de monitoreo continuo de esta estructura histórica puede ser sustancialmente reducido.

En forma similar al área de óptima localización de sensores, los primeros métodos de identificación modal fueron igualmente desarrollados dentro de la industria aeroespacial. Uno de los métodos más usados es el presentado por [6], conocido como algoritmo de realización de valores propios (ERA, Eigensystem Realization Algorithm), el cual ha sido implementado en estructuras civiles por diversos autores. El estudio presentado por [7] estudia las limitaciones del método ERA originalmente propuesto por [6], abordando dos limitaciones del método ERA relacionadas con falta de condiciones iniciales mediante un enfoque preliminarmente propuesto por [8], donde se utiliza el filtro Kalman. Esta mejora es complementada por [7] asumiendo que solo el subsistema estocástico contribuye a la respuesta de salida en estructuras, y, por tanto, el subsistema determinístico puede ser despreciado. Con base en estos dos aspectos, el método propuesto por [7] y definido como ERA-OKID-OO es implementado experimentalmente en los puentes sobre el río Leigh y el puente Golden Gate. Los resultados presentados por [7] demuestran un desempeño superior del método ERA-OKID-OO, con respecto a mejoras previas del método originalmente propuesto por [6].

Este artículo presenta los resultados de identificación modal del puente Gómez Ortiz utilizando mediciones en condición de excitación ambiental tomadas en posiciones óptimas de sensores obtenidas del método implementado en el puente Eduardo Torroja por [5]. Estos resultados de

identificación modal son comparados con las frecuencias experimentales de calibración del modelo numérico de línea base desarrollado por [2], utilizando el método de identificación modal propuesto por [7].

2. Descripción del puente Gómez Ortiz

2.1. Configuración estructural

El puente seleccionado para el presente estudio corresponde al puente Gómez Ortiz, el cual se encuentra localizado sobre la vía que comunica los municipios de Girón y Zapatoca, a 24 km del casco urbano de Zapatoca. La construcción de este puente fue producto de la restitución de infraestructura en el área de inundación del embalse del proyecto hidroeléctrico de Sogamoso. Con una longitud total de 510 m, el puente se compone de dos luces centrales de 170 m y dos tramos de compensación de 85 m cada uno. La superestructura se apoya en 3 columnas, la primera con altura de 42 m en dirección a Zapatoca, y las dos restantes de 47 m. La vista general del puente se aprecia en la figura 1.



Figura 1. Puente Gómez Ortiz. Fuente: [9].

La sección transversal del puente corresponde a una tipología de viga cajón en concreto postensado de altura 8,8 m, en la dovela sobre la columna y 4 m en la dovela de cierre. La sección transversal del puente se ilustra en la figura 2.

Las columnas corresponden a una sección rectangular hueca de sección variable cimentadas sobre pilotes con profundidades entre 25 m y 40 m. Apoyos elásticos en neopreno tipo *slide-flon* sirven de apoyo del puente en los estribos.

2.2. Campañas experimentales de medición

Un total de dos campañas experimentales fueron realizadas, la primera en el año 2015, antes del llenado del embalse y la segunda en el año 2016, durante el

llenado. Para esta segunda campaña, se tiene un total de 26 configuraciones, correspondientes a 234 registros repartidos en las tres coordenadas (78 registros por dirección coordenada). Estas configuraciones fueron utilizadas durante la campaña experimental realizada por [2] para obtener la caracterización dinámica del puente. Cada configuración se compone de mediciones simultáneas de 3 sensores triaxiales (direcciones longitudinal, transversal y vertical del puente). La carga vehicular que se tuvo durante la ejecución de las pruebas fue de baja intensidad, según lo reportado por [2]. El procesamiento de los datos de las mediciones fue realizado mediante el uso del *software* ARTEMIS [10], con base en los métodos FDD, EFDD y SSI. El método FDD mostró los mejores resultados, por lo que estos resultados fueron finalmente usados para realizar la calibración del modelo numérico del puente. Para mayor información con respecto al análisis comparativo de los resultados de caracterización dinámica y criterios de selección de datos de calibración, se recomienda consultar [9].

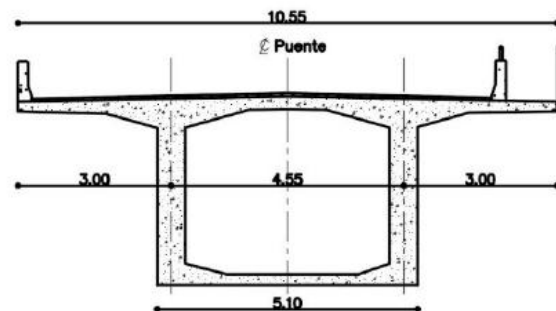


Figura 2. Sección transversal de la viga cajón del puente Gómez Ortiz. Fuente: [2].

2.3. Modelo numérico de línea base

Los datos experimentales de calibración del modelo numérico de línea base utilizado en el presente estudio corresponden al desarrollado por [2]. El modelo inicial del puente corresponde a un modelo lineal desarrollado con base en la geometría obtenida de los planos *as built* y propiedades de materiales con valores de resistencia a compresión del concreto para la superestructura de 35 MPa y columnas de 28 MPa, y valores de módulos de elasticidad de 23377 MPa y 20637 MPa, respectivamente. El *software* MIDAS Civil [11] fue utilizado para ensamblar el modelo numérico inicial del puente utilizando los valores de geometría y materiales anteriormente referenciados [10]. La calibración del modelo de línea base del puente se realizó con base en los resultados de identificación modal del puente según las campañas experimentales anteriormente

referenciadas. Según [2], el puente caracterizado dinámicamente corresponde a una estructura nueva, la cual fue abierta al tráfico en el año 2013 y no ha sido afectada por sismos de magnitud considerable. El parámetro de calibración del modelo de línea base correspondió a módulos de elasticidad con valores de 27300 MPa para la superestructura, y de 23072 MPa para las columnas. Estos valores de calibración se justifican por el uso de concretos acelerados a 2 y 3 días, que alcanzan resistencias superiores a las especificadas en los planos de construcción [2].

3. Planteamiento numérico

3.1. Óptima localización de sensores

La selección del método de óptima localización de sensores se fundamenta en los resultados presentados por [5], donde el modelo numérico calibrado del puente Eduardo Torroja es utilizado con el fin de implementar un procedimiento de localización de sensores que permita describir adecuadamente la respuesta del puente sin la utilización de un número considerable de sensores. 36 posiciones para los sensores fueron consideradas para las 12 configuraciones seleccionadas por los autores, utilizando 5 sensores triaxiales (direcciones longitudinal, transversal y vertical del puente). La superestructura corresponde a un sistema de losas de concreto reforzado con espesor de 7 m y armadura de celosía con cordón en arco [5]. Mientras el puente Eduardo Torroja corresponde a una estructura construida en 1951 con diferentes modificaciones estructurales a lo largo de su vida útil, el puente Gómez Ortiz fue abierto al tráfico en el año 2013.

Los autores utilizan el método de óptima localización de sensores propuesto por [3], llamado método de independencia efectiva (EFI, Effective Independence Method). Este método se fundamenta en que la localización de sensores utilizada para realizar identificación modal debe obedecer a una configuración que permita obtener independencia espacial en los modos de vibración. La Matriz de Información Fisher (MIF) se define simétrica y positiva, según la ecuación (1):

$$MIF = \varphi^T \varphi \quad (1)$$

Donde φ corresponde a la matriz de modos de vibración, con dimensiones asociadas al número de modos de vibración de interés y que son usados para el cálculo de la MIF. Los valores y vectores propios obtenidos de la MIF se definen como λ y ψ , respectivamente. Elevando al cuadrado los términos del producto $\lambda\varphi$, se permite obtener una nueva matriz donde cada elemento representa la contribución de cada punto de medición a cada modo de vibración considerado en el análisis.

Dividiendo cada elemento de la matriz por los inversos de los valores propios, se garantiza que cada elemento en la matriz $\lambda\varphi$ tiene igual importancia. La sumatoria de todos los términos asociados a una determinada posición de sensor representa la contribución de esa posición de sensor a todos los modos de vibración considerados en el análisis.

Finalmente, las posiciones de sensores con valores mayores son las que más contribuyen al rango de la MIF, y, por tanto, se consideran como posiciones óptimas para localizar sensores con el propósito de identificar los modos de vibración considerados en el análisis. La explicación detallada del método EFI se encuentra en [4].

Para la implementación del método EFI se requiere definir los modos de vibración de interés. Para el caso del puente Gómez Ortiz, con base en las campañas experimentales de medición reportadas por [2], se tiene que los modos con mayor valor de índice MAC (Modal Assurance Criterion) corresponden a los modos de vibración con frecuencias 0,683, 0,698 y 1,455 Hz. Estas frecuencias están asociadas a modos de vibración con movimiento predominante en el sentido transversal del puente.

Para la implementación del método EFI en el puente Gómez Ortiz, se seleccionan estos 3 modos de vibración. Si bien el planteamiento de localización de sensores presentado por [5] en el puente Eduardo Torroja utiliza modos de vibración obtenidos del modelo numérico del puente ya calibrado con resultados de campañas experimentales, es importante también considerar que un análisis previo de óptima localización de sensores utilizando modelos numéricos no calibrados es de gran utilidad. Esto con el fin de optimizar los resultados de campañas de identificación modal, teniendo presente que un modelo numérico aproxima desde una perspectiva numérica, pero solo con estudios detallados de identificación modal como el ejecutado por [2] es posible realizar los ajustes necesarios para calibrar un modelo numérico; debido a este aspecto la implementación del método EFI en el puente Gómez Ortiz se realiza con base en los 3 modos de vibración anteriormente descritos, que se obtienen del modelo numérico del puente no calibrado.

La localización de los ejes del puente que sirve de base para referenciar la localización de los sensores se presenta en la figura 2.

Los resultados de la implementación del método EFI se ilustran en la figura 3. Los nodos del modelo numérico se referencian por cada dovela, de acuerdo con los planos *as built*, que, en ciertos casos, no coinciden exactamente con puntos seleccionados en los ensayos de vibración

ambiental. El nodo 53 del modelo numérico es el centro de la luz entre ejes 2 y 3, y corresponde al punto 23 de las mediciones; el nodo 82, cercano al eje 3, sin embargo, no coincide exactamente con una medición. Este punto se encuentra entre las mediciones 33 y 35. Por último, el nodo 102 se ubica cerca al centro de luz entre ejes 3 y 4, y corresponde al nodo 41 medido. El sensor de referencia, que corresponde a un sensor de localización

fija durante todas las mediciones, se ubica entre los puntos 15 y 21, denotado por un triángulo púrpura, según la figura 3.

Las figuras 4, 5, 6 y 7 ilustran las configuraciones seleccionadas según los resultados de óptima localización de sensores presentados en la figura 3.

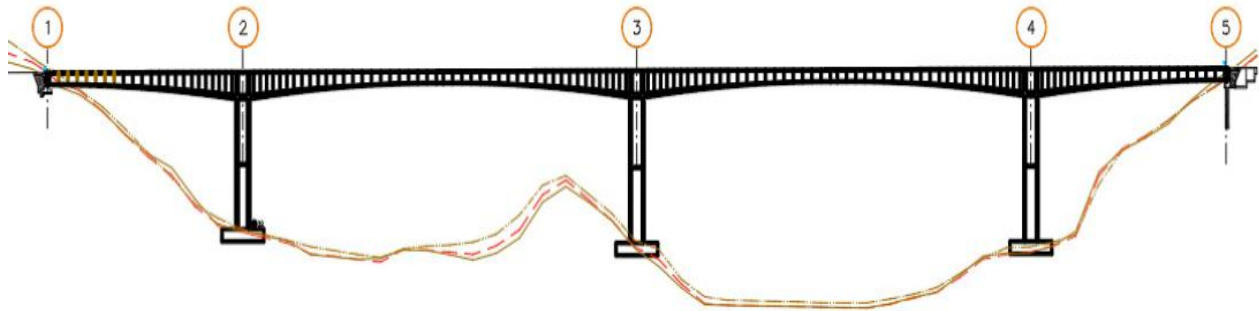


Figura 2. Localización de ejes. Fuente: elaboración propia.

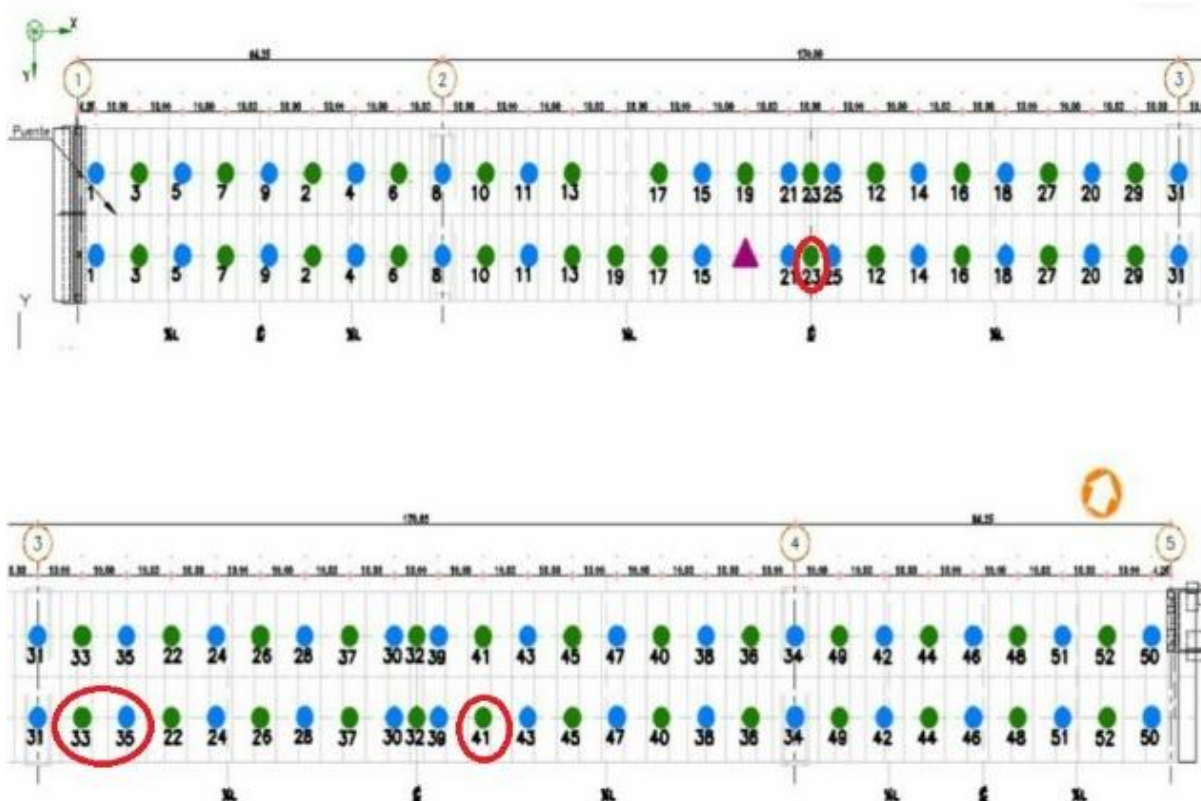


Figura 3. Puntos de medición óptima obtenidos del método EFI. Fuente: elaboración propia.

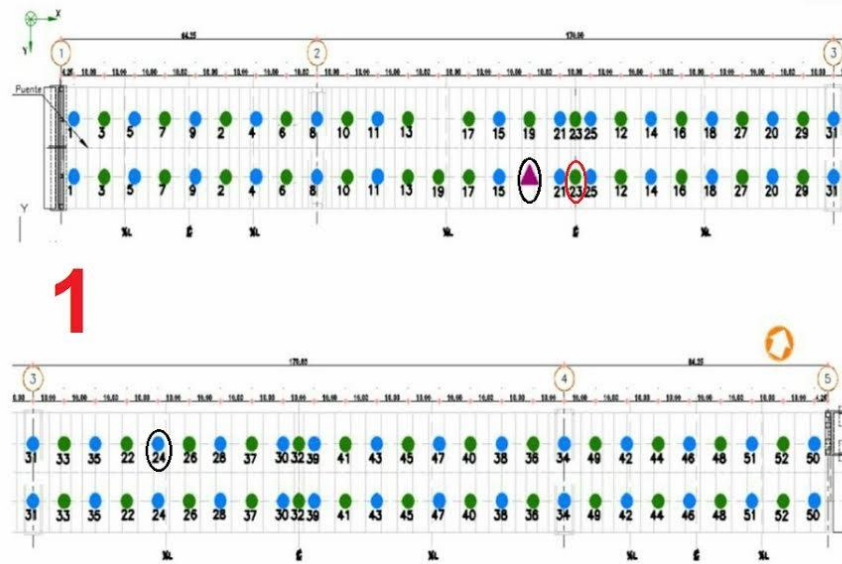


Figura 4. Configuración 1 con base en los resultados del método EFI. Fuente: elaboración propia.

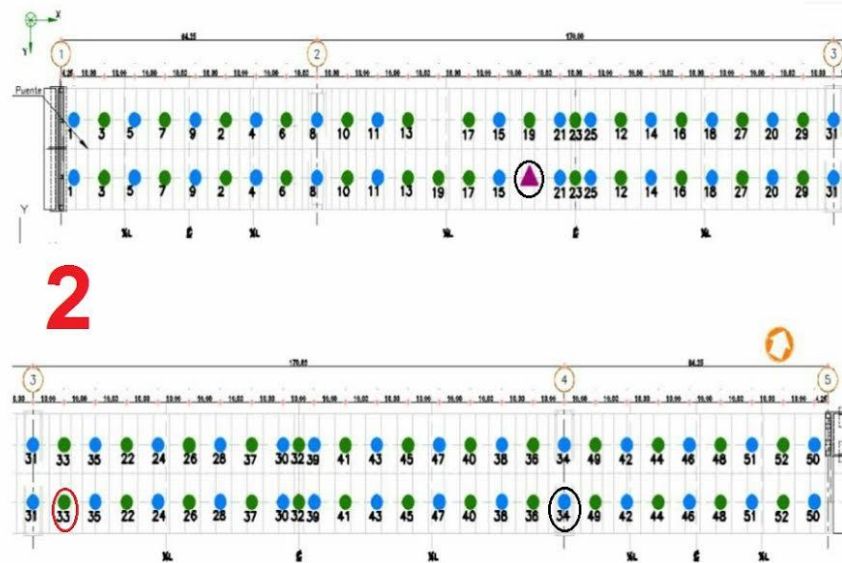


Figura 5. Configuración 2 con base en los resultados del método EFI. Fuente: elaboración propia.

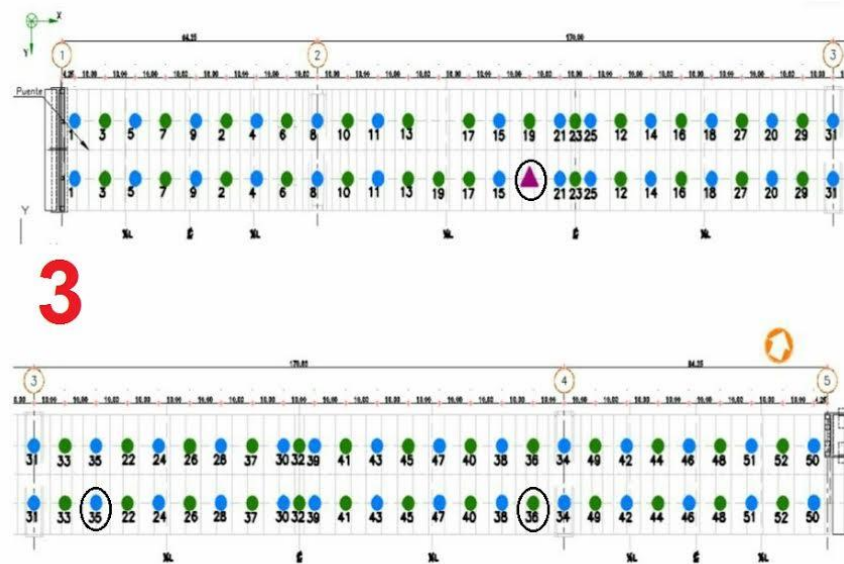


Figura 6. Configuración 3 con base en los resultados del método EFI. Fuente: elaboración propia.

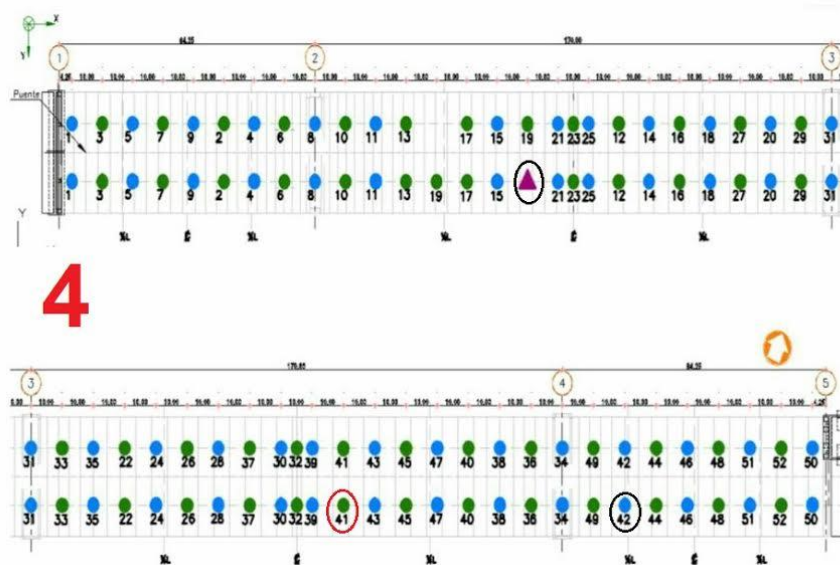


Figura 7. Configuración 4 con base en los resultados del método EFI. Fuente: elaboración propia.

En la fase de identificación modal se toman los datos de la campaña experimental de medición en el puente cuando el embalse se encuentra en proceso de llenado. Es importante resaltar que se utilizaron 3 sensores triaxiales en los ensayos de excitación ambiental. Se seleccionan las configuraciones que contienen al menos uno de los nodos identificados como óptimos mediante el método EFI. Las configuraciones ilustradas en las figuras 4, 5, 6 y 7 están asociadas a los 3 modos de vibración seleccionados anteriormente. En caso de utilizar más

modos de vibración, se debe repetir de nuevo el proceso. Es importante también resaltar que para carga vehicular se espera que los modos verticales sean los más dominantes. En tal caso las configuraciones de óptima localización de sensores deben ser previamente estudiadas con base en este tipo de excitación, y, por tanto, se fundamentarán en identificación de modos verticales. Un estudio completo de localización óptima de sensores debe incluir análisis de diferentes tipos de excitaciones, incluyendo excitación sísmica, con el

objetivo de optimizar la calidad de los resultados de identificación modal.

3.2. Identificación modal

El método de identificación modal utilizado en el presente estudio denominado ERA-OKID-OO fue seleccionado con base en su buen desempeño de aplicación en los puentes sobre el río Leigh y el puente Golden Gate. Un aspecto importante es que el método ERA-OKID-OO demuestra superioridad con respecto a otros métodos de identificación modal cuando es utilizado en campañas experimentales de excitación ambiental. En simulaciones numéricas de identificación modal este método no es tan eficiente, según lo reportado por [7].

El método ERA-OKID-OO corresponde a una versión mejorada del método ERA, el cual ha sido usado en diversos estudios de identificación modal en estructuras civiles. El filtro de observador Kalman (OKID, Observer Kalman-Filter Identification) permite solventar la falta de condiciones iniciales ampliando la aplicabilidad de ERA a sistemas entrada/salida. Para ampliar el concepto de sistemas solo salida (OO, Output-Only systems) se considera la reformulación del subsistema estocástico describiendo la influencia del ruido ambiental expresando el vector de salida con un modelo AR.

Finalmente se obtienen los parámetros Markov. Para mayor información sobre el método ERA-OKID-OO se recomienda consultar [7]. La herramienta SMIT [7] es utilizada para realizar la identificación modal con base en el método ERA-OKID-OO para las 4 configuraciones seleccionadas en la etapa de óptima localización de sensores. La tabla 1 muestra los valores de frecuencias y fracciones amortiguamiento obtenidos para las 4 configuraciones seleccionadas mediante el método ERA-OKID-OO y los valores correspondientes a la campaña experimental [2].

Tabla 1. Frecuencias y fracciones de amortiguamiento para configuraciones de 3 posiciones.

Presente estudio		Reportado por [2]	
Frecuencia [Hz]	Fracción Amort.[%]	Frecuencia [Hz]	Fracción Amort.[%]
0,685	2,95	0,683	2,92
0,723	2,83	0,698	2,36
1,273	4,97	1,455	2,53

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos mediante el método ERA-OKID-OO muestran buena correlación con los valores

reportados por [2]. La primera frecuencia y su correspondiente fracción de amortiguamiento guarda una muy buena correlación con los valores reportados por [2]. La segunda frecuencia y su correspondiente fracción de amortiguamiento también presentan valores similares a los reportados por [2]. Las diferencias más notorias se presentan en la tercera frecuencia y su correspondiente fracción de amortiguamiento. Es importante resaltar que las campañas experimentales ejecutadas por [2] se componen del análisis de 78 registros por dirección coordenada. Una de las grandes limitaciones que existen en términos de monitoreo continuo de puentes radica en los costos asociados a los sensores y el procesamiento de la información. En el caso de campañas experimentales, es común el uso de un mayor número de sensores; por ejemplo, en las campañas realizadas en el puente Eduardo Torroja se utilizaron 5 sensores triaxiales, mientras que en el puente Gómez Ortiz se utilizaron 3 sensores triaxiales. 4 posiciones de localización óptima de sensores se utilizaron para el puente Eduardo Torroja, número suficiente, según [5], para lograr resultados similares a los obtenidos en la campaña experimental. Utilizando este mismo lineamiento se realiza un estudio de óptima localización de sensores en el puente Gómez Ortiz utilizando 2 posiciones de localización óptima de sensores, donde se tiene el sensor de referencia y los puntos de localización identificados por el método EFI y presentados en las figuras 4, 5, 6 y 7. Los resultados de identificación modal utilizando 2 sensores se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Frecuencias y fracciones de amortiguamiento con configuraciones de 3 y 2 posiciones.

Configuración 3 posiciones óptimas		Configuración 2 posiciones óptimas	
Frecuencia [Hz]	Fracción Amort.[%]	Frecuencia [Hz]	Fracción Amort.[%]
0,685	2,95	0,679	1,20
0,723	2,83	0,723	8,93
1,273	4,97	1,176	2,68

Fuente: elaboración propia.

Los valores de primer frecuencia y su correspondiente fracción de amortiguamiento disminuyen con respecto al valor inicial, pero el valor de frecuencia se mantiene en un valor cercano al valor reportado por [2]. En el caso de la fracción de amortiguamiento se presenta variación considerable. La tercera frecuencia presenta en los dos parámetros una variación considerable con respecto a los valores reportados para la configuración de 3 posiciones y los valores reportados por [2], también para 3 posiciones. Es importante resaltar que en el caso de la tercera frecuencia su valor se mantiene igual para las

configuraciones de 3 y 2 sensores. Según [2], esta frecuencia corresponde al modo de vibración transversal con mayor valor de porcentaje de participación de masa, con 48,3 %, mientras que el primer modo de vibración transversal tiene un valor de 7,23 %, y el tercer modo de vibración transversal, un valor de 16,6 %.

3.3. Análisis de resultados

Los métodos de óptima localización de sensores se fundamentan en su gran mayoría en el uso de modos de vibración. El método EFI implementado en el presente estudio utiliza los 3 modos de vibración transversal seleccionados por [2] en la calibración del modelo numérico de línea base del puente Gómez Ortiz. Las configuraciones seleccionadas como óptimas según los resultados de la implementación del método EFI en el puente Gómez Ortiz presentan valores de identificación modal con muy buena aproximación a los reportados por [2], en sus campañas experimentales, donde se utiliza un mayor número de configuraciones. En el caso de configuraciones de 2 sensores, utilizando los resultados del método EFI, se encuentra buena correlación en los valores de frecuencia para los dos primeros modos de vibración. Es importante resaltar que el segundo modo de vibración se identificó con valores iguales sin importar el uso de configuraciones de 2 y 3 sensores. Este hallazgo es importante por ser el modo transversal con más alto porcentaje de participación de masa, y, por tanto, es también el de mayor contribución a la respuesta dinámica transversal del puente Gómez Ortiz.

4. Conclusiones

En el presente estudio se implementa un método de óptima localización de sensores para el puente Gómez Ortiz. La selección de este método se fundamenta en los resultados obtenidos en las recientes campañas experimentales realizadas en el puente Eduardo Torroja, donde se evidencia la efectividad del método para estudios de identificación modal en puentes de rigidez superior a la de un puente atirantado. Esto por cuanto la mayor cantidad de estudios de óptima localización de sensores reportados en la literatura se han realizado en puentes atirantados. Para la identificación modal, de igual forma se selecciona un método de reciente desarrollo y que fue implementado con éxito en campañas experimentales llevadas a efecto en los puentes sobre el río Leigh y el puente Golden Gate.

Los resultados presentados en el presente estudio muestran una buena correlación con los reportados en las campañas experimentales realizadas en el puente Gómez Ortiz, que consideran 3 posiciones, con respecto a las configuraciones de 2 posiciones presentadas en el presente estudio, con lo cual se evidencia la importancia

de complementar los estudios numéricos preliminares a las campañas de mediciones, con resultados de configuraciones resultantes de la implementación de algoritmos de óptima localización de sensores. Este tipo de estudios permite determinar las zonas más favorables para instrumentación en las campañas de medición.

El tipo de excitación dominante en un puente debe ser estudiado de igual forma antes de las campañas de medición; se debe determinar de igual forma la dirección de excitación dominante. El enfoque presentado en el presente estudio se fundamenta en el uso de modos de excitación transversal, para casos de excitación donde la carga vehicular sea dominante se deben utilizar modos de vibración vertical en la determinación de las configuraciones de localización de sensores más favorables para identificación modal. Un estudio robusto de óptima localización de sensores debe abordar todas las fuentes de excitación presentes en un puente, incluyendo las cargas sísmicas, con el fin de lograr la máxima optimización posible para un número determinado de sensores, para, de esta forma, tener una herramienta en la toma de decisiones de integridad estructural ante la ocurrencia de un evento extremo. Finalmente, según los resultados del presente estudio, se puede resaltar la eficacia del método ERA-OKID-OO en la determinación no solo de las frecuencias, sino de las fracciones de amortiguamiento.

5. Recomendaciones

Se recomienda complementar el enfoque presentado en este estudio con campañas de excitación ambiental en condiciones de mayor flujo vehicular, con el fin de identificar modos de vibración vertical para el desarrollo de sistemas de monitoreo continuos más robustos que puedan capturar la respuesta dinámica del puente en condiciones de operación. Estudios dinámicos de respuesta ante cargas sísmicas son importantes con el fin de estudiar la respuesta del puente según las variables de sitio. Estos análisis deben incluir información relevante del sitio de fundación del puente y modo de respuesta no lineal, que permitan determinar zonas del puente que requieren instrumentación adicional o que se verían altamente excitadas bajo eventos sísmicos. Estudios realizados en puentes con monitoreo continuo evidencian que la excitación sísmica, debido a su alto contenido de energía, permite identificar modos con altas frecuencias y respuesta más energética de modos de baja vibración, con lo cual se puede complementar la información proporcionada en el presente estudio y los estudios anteriormente recomendados de identificación modal con un mayor flujo vehicular. El presente estudio debe ser complementado con la utilización de modos de vibración de un modelo calibrado, para desarrollo de sistemas de

monitoreo continuo. Adicionalmente se debe incluir mediciones de temperatura, a fin de considerar los efectos que los gradientes en este parámetro pueden ocasionar en la determinación de las propiedades dinámicas del puente y que puedan afectar la confiabilidad en la implementación de sistemas de monitoreo continuo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander y del grupo de investigación INME.

Referencias

- [1] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, Norma Colombiana de Diseño de Puentes. Comité AIS-200, 2014.
- [2] A. Viviescas, J. Carrillo y L. Vargas, “Línea base para el monitoreo de salud estructural del puente Gómez Ortiz a partir de pruebas de vibración ambiental,” *Rev. INGE CUC*, vol. 14, no. 1, pp. 52-65, 2018.
- [3] D. Kammer y L. Yao, “Enhancement of on orbit modal identification of large space structures through sensor placement,” *J. Sound and Vibration*, vol. 171, no. 1, pp. 119-139, 1994. doi: 10.1006/jsvi.1994.1107
- [4] C. Riveros, E. García y J. Rivero, “A comparative study of sensor placement techniques for structural damage detection,” *Revista EIA*, vol. 10, pp. 23-37, 2013.
- [5] P. Pachón, *et al.* “E. Torroja’s bridge: tailored experimental setup for SHM of a historical bridge with a reduced number of sensors,” *Engineering Structures*, vol. 162, pp. 11-21, 2018. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.02.035
- [6] J. Juang y R. Pappa, “An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction,” *J. Guid. Control Dyn.*, vol. 8, no. 5, pp. 620-627, 1985.
- [7] M. Chang y S. Pakzad, “Observer Kalman filter identification for output-only systems using interactive structural modal identification toolsuite,” *J. Bridge Engineering*, vol. 19, no. 5, pp. 04014002, 2014. doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000530
- [8] J. Juang, “System realization using information matrix,” *J. Guid. Control Dyn.*, vol. 20, no. 3, pp. 492-500, 1997.
- [9] Laura Vargas, “Propuesta de plan de monitoreo del comportamiento dinámico para la salud estructural del nuevo puente Gómez Ortiz en la vía Girón Zapotoca”, trabajo de fin de maestría, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [10] ARTEMIS, “ARTEMIS Enhanced Frequency Domain Decomposition, Structural Vibration Solution”, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://svibs.com>
- [11] MIDAS Information Technology Co. Ltd., *Midas User Manual, MIDAS Information Technology*, Seongnam, South Korea, 2016.